

تأثیر تغییرات عناصر پر مصرف در محلول غذایی و محلول پاشی سلیوم بر رشد و جذب عناصر معدنی در کلم کیل (*Brassica oleracea* var. *Sabellica*)

چکیده

کیل (*Brassica oleracea* var. *Sabellica*) به دلیل دوره رشد کوتاه، مصارف مختلف و مشخصات متابولیکی و تغذیه‌ای مطلوب، یکی از سبزی‌های مهم و با ارزش تجاری بالا است. بنابراین تغذیه مناسب برای این سبزی و بهبود رشد آن از اهمیت زیادی در کشت‌های گلخانه‌ای برخوردار است. در پژوهش حاضر، اثر محلول‌های غذایی مختلف و سطوح متفاوت محلول پاشی سلیوم بر رشد و جذب عناصر معدنی گیاه کلم کیل مورد مطالعه قرار گرفت. آزمایش به صورت فاکتوریل بر پایه طرح کاملاً تصادفی در سه تکرار اجرا گردید. فاکتور اول شامل سه محلول غذایی مختلف بود که محلول غذایی شماره یک به‌طور کلی رقیق‌تر از دو محلول دیگر بود و محلول غذایی شماره دو، در مقایسه با محلول غذایی شماره سه غلظت کمتری از نیتروژن، کلسیم و پتاسیم داشت. فاکتور دوم شامل چهار سطح سلیوم (صفر، ۵، ۱۰ و ۱۵ میلی‌گرم در لیتر سدیم سلات) بود. نتایج نشان داد که اثر محلول غذایی و محلول پاشی سلیوم بر صفات مورد مطالعه معنی‌دار بود. بیشترین مقدار درصد ماده خشک کل برگ (۱۶.۶۵ درصد)، وزن تازه ساقه (۴۷.۴۳ گرم)، درصد ماده خشک ساقه (۱۸.۶۱ درصد) و طول ساقه (۱۹.۷۵ سانتی‌متر) در گیاهان رشد یافته در محلول غذایی شماره سه (با کلسیم و نیترات بالاتر نسبت به محلول یک و دو) و محلول پاشی شده با سلیوم ۱۰ میلی‌گرم در لیتر بدست آمد. همچنین نتایج نشان داد که وزن تازه کل برگ در محلول غذایی شماره سه (۳۸۳.۶۳ گرم) و در تیمار سلیوم ۱۰ میلی‌گرم در لیتر (۳۷۵.۶۱ گرم) بیشترین مقدار را داشت. از نظر مقدار عناصر معدنی بافت، بیشترین میزان نیتروژن، فسفر، پتاسیم و کلسیم در گیاهان رشد یافته در محلول غذایی شماره سه و سطح ۱۰ میلی‌گرم در لیتر سلیوم بدست آمد. نتایج نشان داد که سلیوم در کاهش نیترات نقش مثبت داشت و کمترین مقدار نیترات (۰.۴ میلی‌گرم بر گرم وزن تر) تحت محلول پاشی ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر به دست آمد. علاوه بر آن، بیشترین مقدار سلیوم بافت (۶۳.۳۳ میکروگرم در گرم وزن خشک) نیز در محلول غذایی شماره سه و سطح ۱۵ میلی‌گرم در لیتر محلول پاشی سلیوم بدست آمد. به طور کلی نتایج حاکی از آن است که در گیاهان کلم کیل رشد یافته در محلول غذایی شماره سه و محلول پاشی شده با سطح ۱۰ میلی‌گرم در لیتر سلیوم بیشترین رشد و جذب عناصر غذایی مشاهده گردید.

کلیدواژه‌ها: سلیوم، عناصر معدنی، کلم بروکلی چینی، محلول پاشی برگ، آبکشت.

The effect of changes in macronutrients in nutrient solution and selenium foliar application on growth and mineral element absorption in kale (*Brassica oleracea* var. *Sabellica*)

Abstract

Kale (*Brassica oleracea* var. *Sabellica*) is one of the important vegetables with high commercial value due to its short growth period, various uses, and favorable metabolic and nutritional characteristics. Therefore, proper nutrition for this vegetable and improving its growth is very important in greenhouse cultivation. In the present study, the effect of different nutrient solutions and different levels of selenium foliar application on the growth and absorption of mineral elements of kale was studied. The experiment was carried out as a factorial based on a completely randomized design with three replications. The first factor included three different nutrient solutions, where nutrient solution number one was generally more dilute than the other two solutions, and nutrient solution number two had a lower concentration of nitrogen, calcium, and potassium compared to nutrient solution number three. The second factor included four selenium levels (0, 5, 10, and 15 mg/L sodium selenate). The results showed that the effect of nutrient solution and selenium foliar application on the studied traits was significant. The highest percentage of total leaf dry matter (16.65%), fresh stem weight (47.43 g), dry stem percentage (18.61%), and stem length (19.75 cm) were obtained in plants grown in nutrient solution number three (with higher calcium and nitrate than solutions one and two) and foliar application of 10 mg/L selenium. The results also showed that the highest total fresh leaf weight was observed under nutrient solution number three (383.63 g) and 10 mg/L selenium treatment (375.61 g). In terms of the amount of tissue mineral elements, the highest amounts of nitrogen, phosphorus, potassium, and calcium were obtained in plants grown in nutrient solution number three and 10 mg/L selenium. The results showed that selenium had a positive role in reducing nitrate, and the lowest amount of nitrate (0.4 mg/g fresh weight) was obtained under foliar application of 10 mg/L. In addition, the highest amount of tissue selenium (63.33 µg/g dry weight) was also obtained in nutrient solution number three and selenium foliar application of 15 mg/L. Overall, the results indicate that the highest growth and nutrient uptake were observed in kale plants grown in nutrient solution number three and foliar application of 10 mg/L selenium.

Extended Abstract

Introduction

Kale, also known as Chinese broccoli, is a vegetable rich in vitamins C, A, B1, B2, B6, and E. Additionally, it contains dietary fiber, micronutrients such as iron, zinc, and manganese, as well as macronutrients like calcium and magnesium. Studies have demonstrated that the phenolic compounds found in fresh kale positively contribute to the prevention of chronic cardiovascular

diseases. Furthermore, incorporating kale into various dishes enhances both their flavor and visual appeal. As a result, products enriched with kale stand out among other vegetables in the same family. Research underscores the importance of increasing the consumption of these vegetables in the human diet. Selenium is an essential micronutrient for human health, necessary for the proper functioning of various physiological and metabolic processes, including thyroid hormone metabolism, immune system function, and antioxidant defense. Research indicates that only 5-20% of selenium fertilizers are absorbed by plants, while the remainder remains insoluble in the soil, rendering it inaccessible to them. This raises concerns about potential pollution resulting from the application of selenium fertilizers. Since selenium cannot be added directly to food, the selenium content in plants can be increased through several methods, such as incorporating selenium into the soil, soaking seeds in a selenium solution before planting, utilizing hydroponic and aeroponic systems, and applying it via foliar methods. The quest for new food sources rich in this element presents a significant scientific challenge. Producing selenium-enriched foods, particularly vegetables and plant sprouts, could be a valuable strategy to address this issue, offering a preventive effect against diseases associated with selenium deficiency.

Materials and Methods

In order to investigate the effects of three nutrient solutions and selenium foliar application on the quantitative yield and mineral element absorption of kale plants, a factorial experiment was conducted based on completely randomized design with three replications. This study took place in a vegetable research greenhouse with a glass cover, part of the Horticultural Science and Landscape Engineering Department at the University of Tehran, located in Karaj City. The treatments examined included three types of nutrient solutions and four levels of selenium foliar application (0, 5, 10, and 15 mg/L of sodium selenate). The measured traits included the fresh and dry weight of leaves, the number of leaves, the fresh and dry weight of the stem, the length and diameter of the stem, and the concentrations of nitrogen, nitrate, phosphorus, calcium, potassium, and selenium in the tissue of the kale plant.

Results and Discussion

Our results demonstrated that the effects of nutrient solution and selenium foliar application on the examined traits were significant. The highest fresh and dry weights of the leaves, the number of leaves, the fresh and dry weights of the stem, as well as the length and diameter of the stem, were observed in the plants grown in nutrient solution number three and treated with 10 mg/L of selenium. Regarding the mineral content of the tissue, the highest concentrations of nitrogen, nitrate, phosphorus, potassium, and calcium were found in the plants grown in nutrient solution number three with 10 mg/L of selenium. Additionally, the highest tissue selenium concentration was recorded in nutrient solution number two at a level of 15 mg/L of selenium. Overall, our findings indicated that nutrient solution number three, which contained higher levels of calcium and nitrate compared to nutrient solutions one and two, along with the application of 10 mg/L of selenium, resulted in the greatest morphological traits and element absorption in kale. Plant biofortification methods provide swift solutions to address micronutrient deficiencies in populations with insufficient dietary intake. The findings of this study can inform the development of new enriched products, such as ready-made salads and juices. Furthermore, additional research is necessary to explore the bioavailability and biofortification effects of selenium on the quantitative and qualitative characteristics of various vegetables and summer crops.

Conclusion

Our results indicated that the maximum number of morphological traits and mineral elements in kale plants was achieved when grown in nutritional solution number three. In this solution, the levels of nitrate and calcium were higher compared to nutritional solutions one and two. Additionally, the application of selenium via foliar spray enhanced the morphological characteristics and element absorption in kale. The most effective concentration of selenium for improving the studied traits was found to be 10 mg/L.

کیل^۱، یا کلم بروکلی چینی، یک سبزی برگ‌دار محبوب از خانواده چلیپائیان^۲ است. کیل یک سبزی با غلظت بسیار بالایی از ویتامین‌های A، B1، B2، B6 و E است (Soja et al., 2023). علاوه بر این، حاوی فیبر غذایی، ریزمغذی‌ها (آهن، روی و منگنز) و درشت مغذی‌ها (کلسیم و منیزیم) است (Kim et al., 2008). مطالعه‌ها نشان داده است که مصرف ترکیبات فنلی موجود در کلم کیل تازه تاثیر مثبتی بر پیشگیری از بیماری‌های مزمن قلبی عروقی دارد (Kim et al., 2008; Kasprzak et al., 2018) و به کاهش خطر بیماری عروق کرونر کمک می‌کند. علاوه بر این، افزودن کیل به غذاها موجب بهبود طعم و ظاهر مطلوب آنها می‌شود. بنابراین، محصولات غنی شده با کیل از سایر سبزی‌های همین خانواده متمایزتر است (Soja et al., 2023). در نتیجه، در سال‌های اخیر، این سبزی محبوبیت زیادی در صنایع غذایی پیدا کرده است و اغلب از آن به عنوان یک «ابر غذا» یاد می‌شود (Mirmiran et al., 2022).

با رشد سریع جمعیت و ثابت بودن نهاده‌ها، پاسخ به نیاز جمعیت در حال رشد بشر مشکل خواهد بود. پس در شرایط فعلی استفاده از فناوری‌های جدید و افزایش عملکرد تنها راه ممکن خواهد بود و طبق یافته‌های پیشین، تکنیک‌های آبکشت^۳ در کشت سبزی‌های برگی، روش موفق‌تری می‌باشد (Son et al., 2020). در سیستم‌های آبکشت و بدون خاک، رعایت نکات خاصی به منظور فراهم‌سازی شرایط بهینه رشد و تولید گیاه، لازم می‌باشد. در میان مسائل مختلف، تنظیم و مدیریت محلول غذایی دارای اهمیت زیادی بوده و با استفاده از فرمولاسیون محلول‌های غذایی مناسب، می‌توان در سریع‌ترین زمان به محصول با کیفیت رسید و به بازار عرضه کرد (Michalovicz et al., 2019). ترکیب محلول غذایی و نسبت مقدار آب به نمک‌های محلول، تعیین‌کننده مقدار جذب آب و عناصر در گیاه خواهد شد (Van Delden et al., 2020). نیترات به عنوان یکی از مهمترین منابع نیتروژن برای رشد و نمو گیاه به طور گسترده در تولید سبزی‌ها کاربرد دارد و تقریباً ۸۰ درصد از ورود روزانه نیترات به بدن انسان از سبزی‌ها حاصل می‌شود (Bo et al., 2018). مطالعات نشان داده‌اند که مصرف سبزی‌ها با محتوای نیترات زیاد، سلامتی انسان را تهدید می‌کند (Tan et al., 2024). بنابراین همواره نیاز به تحقیق مستمر در مورد عوامل موثر بر محتوای نیترات در محصولات کشاورزی وجود دارد (Wojciechowska et al., 2016). برای کنترل و کاهش محتوای نیترات در سبزی‌های برگی از طریق مدیریت مناسب شیوه‌های کشت مانند میزان و فرم کاربرد نیتروژن، کاربرد عناصر مفید از جمله سلیوم و ...، می‌توان اقدام کرد. این عنصر برای سلامتی انسان اهمیت زیادی داشته و مسئول تعدادی از عملکردهای فیزیولوژی در بدن انسان است. سطح سلیوم بهینه در بدن، خطر ابتلا به بیماری‌های غیرواگیر از جمله سرطان را کاهش می‌دهد (Ferreira et al., 2021). از آنجایی که کمبود سلیوم در رژیم غذایی روزانه، یک مشکل رایج در بسیاری از کشورها است، جستجو برای منابع غذایی جدید حاوی این عنصر، یک چالش علمی مهم است. تولید مواد غذایی غنی شده با سلیوم بویژه سبزی‌ها و جوانه‌های گیاهی ممکن است ایده‌ای ارزشمند برای حل این مشکل باشد که اثر پیشگیرانه‌ای در برابر بیماری‌های مرتبط با کمبود سلیوم ارائه می‌نماید (Radomska et al., 2021).

گیاهان عالی ممکن است سلیوم نیاز نداشته باشند و یا حساس به سمیت سلیوم باشند، اما شواهدی وجود دارد که سلیوم به دلیل داشتن خواص آنتی‌اکسیدانی ممکن است اثر بیولوژیکی مفیدی در گیاهان داشته باشد. در غلظت‌های مناسب، سلیوم بر جوانه‌زنی بذر، رشد گیاه و کیفیت سبزی‌ها و میوه‌ها تاثیر مثبت می‌گذارد (Song et al., 2015). سلیوم از گیاهان در برابر چندین تنش غیر زنده، از جمله اشعه ماورای بنفش، فلزات سنگین و آرسنیک، و تنش‌های زیستی، از جمله پاتوژن‌ها و گیاهخواران محافظت می‌کند (Schiavon & Pilon-Smits, 2017). سلیوم با مهار پراکسیداسیون لیپیدی، با تنش‌های اکسیداتیو مقابله می‌کند (Cheng et al., 2023). تیمار با سلیوم با کاهش شدت تنفسی و تقلیل تولید اتیلن در کلم بروکلی (Lv et al., 2017)، با کاهش فعالیت فنیل آلانین آمونیلایز و تولید اتیلن در کاهو و کاسنی (Malorgio et al., 2009)، و همچنین با کاهش تولید اتیلن در گوجه فرنگی (Xue et al., 2012) تاثیر مثبتی بر حفظ کیفیت حسی و پس از برداشت داشته است. با توجه به توانایی آن در افزایش دفاع

¹ - *Brassica oleracea* var. *sabellica*

² - Cruciferae

³ Hydroponics

آنتی اکسیدانی گیاهان، مشخص شده است که سلیوم باعث به تاخیر انداختن پیری گیاه و رسیدن میوه در چندین گونه باغبانی می‌شود، که می‌تواند منجر به کاهش تلفات پس از برداشت شود (Poblaciones & Broadley, 2022).

پیشینه پژوهش

تغذیه مناسب گیاه می‌تواند به عملکرد بیشتر و تولید محصولات مرغوب‌تر منجر شود. رشد بهینه، عملکرد مطلوب و ویژگی‌های کمی و کیفی مورد قبول محصول‌های کشاورزی تحت تاثیر مقدار کافی عناصر غذایی، نسبت‌های مناسب عناصر و همچنین فرم‌های مختلف یک عنصر و برهمکنش آن‌ها در محلول غذایی است (Gustiar *et al.*, 2020; Buturi *et al.*, 2021; do Moraes *et al.*, 2023). اثر مثبت سلیوم بر عملکرد و کیفیت در گیاهان مختلف مانند گندم (Xia *et al.*, 2020)، کلم بروکلی (Poblaciones & Broadley, 2022)، گیاه زینتی سلوی (Biranvand *et al.*, 2023)، نعناع فلفلی (Shamsabadi *et al.*, 2023) و کاهو (Cheng *et al.*, 2023) گزارش شده است. Xue *et al.*, (2012) گزارش کردند که محلول‌پاشی سلیوم وزن تک میوه و سطوح قند محلول و ویتامین C میوه گوجه‌فرنگی را افزایش داد، در حالی که سطوح نیترات و اسید قابل تیتراسیون در میوه روند کاهشی داشت. Tavan *et al.*, (2024) گزارش دادند که در کلم کیل غنی‌سازی محلول غذایی با غلظت ۲۰ میکرومولار سلیوم منجر به تیمار بهینه برای اهداف مصرف تازه‌خوری و تامین این عنصر در رژیم غذایی انسان در آینده شد. همچنین Kucukyumuk & Suarez, (2021) گزارش دادند که افزودن سلیوم عملکرد کلم کیل را در تمام سطوح شوری افزایش داد و افزودن ۰/۲۵ میلی گرم سلیوم به ازای هر کیلوگرم خاک، برای افزایش عملکرد به طور متوسط ۱۱ درصد نسبت به شاهد کافی بود. مطالعات انجام شده برای تقویت زیستی گیاهان خوراکی با ترکیبات مختلف سلیوم، نشان داده است که گیاهان خانواده کلم، یکی از بالاترین قابلیت‌های سنتز و تجمع سلیوم را دارند (Zagrodzki *et al.*, 2020). با وجود اینکه سلیوم در غلظت‌های پایین به عنوان محرک رشد و نمو و فعالیت‌های فتوسنتز در گیاهان است، ولی در غلظت‌های بالا منجر به کلروز و نکروز برگ‌ها، کاهش رشد و در نهایت مرگ گیاه می‌شود (Wang *et al.*, 2012). Abdalla *et al.*, (2021) با محلول‌پاشی سلیوم بر گیاهان کاهو، بیان کردند که بالاترین غلظت سلیوم در محلول‌پاشی غلظت ۰/۶ میکرومولار مشاهده شد. آن‌ها همچنین اثر مثبت کاربرد سلیوم را بر ظرفیت آنتی‌اکسیدانی کاهو مشاهده کردند. Zafeiriou *et al.*, (2022a) بیشترین زیست‌توده کاهو را تحت ۵ میکروگرم در کیلوگرم Na_2SeO_4 در مقایسه با شاهد و سایر تیمارهای سلیوم مشاهده کردند. در پژوهشی دیگر، Zafeiriou *et al.*, (2022b) بیان کردند که غلظت ۱۰ میلی گرم در کیلوگرم Na_2SeO_4 از رشد کاهو جلوگیری می‌کند به طوری که باعث ایجاد علائم سمیت می‌شود. Tao *et al.*, (2023) گزارش کردند که محلول‌پاشی سلیت با غلظت ۵ گرم در هکتار بر گندم سیاه باعث افزایش فتوسنتز برگ شد. همچنین وزن ماده خشک دانه و محتوای سلیوم با افزایش غلظت سلیوم، به‌طور خطی افزایش یافت. بنابراین یافتن مقادیر مناسب مورد استفاده در طی فرآیند تقویت زیستی از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است و در این تحقیق تلاش بر این است که با استفاده از محلول‌پاشی سطوح مختلف سلیوم بر کلم کیل، گامی در این راستا برداشته شود. با توجه به مسائل ذکر شده، این مطالعه به منظور بررسی تاثیر محلول‌های غذایی مختلف و سطوح سلیوم بر صفات مورفولوژی و جذب عناصر معدنی کلم کیل مورد بررسی قرار گرفته است.

روش‌شناسی پژوهش

زمان و محل اجرای آزمایش

این آزمایش در بهار و تابستان سال ۱۴۰۱ در گلخانه تحقیقاتی سبزی‌کاری با پوشش شیشه‌ای متعلق به گروه علوم و مهندسی باغبانی و فضای سبز دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران واقع در شهرستان کرج انجام شد. از لحاظ جغرافیایی این مکان در ۳۵ درجه و ۴۷ دقیقه شمالی، ۵۰ درجه و ۵۹ درجه شرقی و ارتفاع ۱۳۱۲/۵ متر بالاتر از سطح دریا قرار دارد.

طرح آزمایشی و تیمارهای اعمال شده

به منظور مطالعه اثر سه محلول غذایی و محلول‌پاشی سلیوم بر عملکرد کمی و جذب عناصر معدنی گیاه کلم کیل، آزمایشی به صورت فاکتوریل در قالب طرح پایه کاملاً تصادفی در سه تکرار اجرا شد. تیمارهای مورد مطالعه شامل سه نوع محلول غذایی (که فرمول آنها در جدول‌های ۱ و ۲ آمده است) و چهار سطح محلول‌پاشی سلیوم (صفر، ۵، ۱۰ و ۱۵ میلی گرم بر لیتر سدیم سلیت)

بودند. اسامی محلول‌های غذایی بدین شکل می‌باشد: محلول شماره یک به عنوان شاهد که رقیق‌ترین محلول مورد مطالعه بوده (Babalar et al., 2009) و همچنین محلول‌های غذایی طراحی شده برای این آزمایش یعنی محلول شماره دو و محلول شماره سه می‌باشند. برای تهیه محلول‌ها ابتدا محلول استوک در آزمایشگاه تغذیه گروه علوم باغبانی تهیه شد. با استفاده از روش تیتراسیون مقدار اسید نیتریک مورد نظر برای تنظیم pH در محدوده ۶/۵ بدست آمد. سپس استوک‌ها در گلخانه به منظور رسیدن به محلول نهایی رقیق شدند و در نهایت پس از تهیه محلول‌های غذایی، مجدداً نمونه‌ای از محلول‌ها جهت کنترل دقیق pH به آزمایشگاه انتقال داده شدند. پس از آن در صورت نیاز با استفاده از اسید نیتریک ۰/۱ نرمال (HNO_3) و سود ۰/۵ نرمال (NaOH)، pH آنها تنظیم شد.

جدول ۱. فرمول عناصر ماکرو محلول غذایی سه محلول غذایی مورد استفاده (meq/L)

	محلول غذایی یک (شاهد)					محلول غذایی دو					محلول غذایی سه				
	NO_3	PO_4	SO_4	Cl	Total	NO_3	PO_4	SO_4	Cl	Total	NO_3	PO_4	SO_4	Cl	Total
K	۱/۱	۰/۳ ۰/۲	-	-	۱/۶	۲	۰/۸ ۰/۶	۱/۵	-	۴/۹	۳	۰/۸ ۰/۶	۱/۵	-	۵/۹
Na	-	-	-	۰/۱	۰/۱	-	-	-	۰/۲	۰/۲	-	-	-	۰/۲	۰/۲
Ca	۱/۵	-	-	-	۱/۵	۳	-	-	-	۳	۷	-	-	-	۷
Mg	-	-	۱	-	۱	-	-	۱/۵	-	۱/۵	-	-	۱/۵	-	۱/۵
NH_4	۰/۱	-	-	-	۰/۱	۱	-	-	-	۱	۲	-	-	-	۲
H	-	۰/۶ ۰/۱	-	-	۰/۷	-	۱/۶ ۰/۳	-	-	۱/۹	-	۱/۶ ۰/۳	-	-	۱/۹
Total	۲/۷	۱/۲	۱	۰/۱	۵	۶	۳/۳	۳	۰/۲	۱۲/۵	۱۲	۳/۳	۳	۰/۲	۱۸/۵

جدول ۲. مقادیر عناصر غذایی میکرو در هر سه محلول غذایی (mg/l)

ترکیب عنصری	مولیبدات آمونیوم	اسید بوریک	سولفات منگنز	سولفات مس	سولفات روی	سکسترن آهن
مقدار	۰/۰۵	۱/۵	۲	۰/۲۵	۱	۱۰

پیاده کردن طرح در گلخانه

بذرهای کلم کرلی کیل در سینی‌های ۷۲ حجره‌ای حاوی مخلوط پرلیت و کوکوپیت (۱:۱ حجمی) کشت شدند. حدود ۷ روز پس از کشت، بذرها جوانه زدند و لپه‌ها ظاهر شدند. با پیشرفت رشد گیاهچه و گسترش سیستم ریشه‌ای، اولین برگ‌های حقیقی نمایان شده و گیاهچه‌ها وارد مرحله‌ی نشاء شدند. با ظهور برگ‌های حقیقی، نشاءها با محلول غذایی هوگلند نصف غلظت تغذیه شدند. نشاءهای سالم در مرحله چهار برگی در گلدان‌های پلاستیکی (به قطر و ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر) حاوی بستر مخلوط پرلیت و کوکوپیت (۱:۱ حجمی) و با فواصل بین و روی ردیف ۵۰ سانتی‌متر کاشته شدند. محلول غذایی روزی سه نوبت و یا بیشتر با مقادیر مختلف (بسته به دما و مرحله رشد گیاه) و به صورت قطره‌ای در اختیار گیاهان قرار داده شد. محل اجرای طرح، وسایل مورد استفاده، گلدان‌ها و مخازن محلول غذایی با هیپوکلرید سدیم ضدعفونی شدند و در طول دوره رشد از سم دیازینون جهت کنترل مگس سفید و همچنین نوار چسب زرد استفاده شد. وسیله گرمایش گلخانه هیت‌ر بوده و دمای بیشینه و کمینه به طور روزانه با استفاده از دماسنج ماکزیمم-مینیمم مشخص گردید. در این آزمایش ۳ محلول غذایی با ۴ سطح سلنیوم، ۳ تکرار و ۴ مشاهده در هر واحد آزمایشی و در مجموع ۱۴۴ بوته مورد استفاده قرار گرفت که در برداشت نهایی از ۱۴۴ بوته‌ی کشت شده، ۳ گیاه در هر تکرار برای ارزیابی صفات مدنظر مورد استفاده قرار گرفتند. محلول پاشی سلنیوم سه نوبت با فاصله زمانی ۱۴ روز یکبار، در ساعات خنک روز بوسیله‌ی محلول پاش دستی تا زمان خیس شدن کامل برگ‌ها انجام شد.

صفات ارزیابی شده

مقدار وزن تازه و درصد ماده خشک برگ و ساقه، تعداد برگ، قطر و طول ساقه

پس از انتقال گیاهان به آزمایشگاه، تعداد برگ‌ها در نمونه شمارش شد و وزن تازه برگ‌ها و ساقه با استفاده از ترازوی دیجیتالی اندازه‌گیری شد. برگ‌ها و ساقه گیاهان در داخل پاکت‌های مقوایی قرار داده شده و داخل آون در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد تا رسیدن به وزن ثابت نگهداری شدند. بعد از خشک شدن اندام‌ها، پاکت‌ها از آون خارج و وزن خشک آنها توسط ترازوی دیجیتالی اندازه‌گیری شد.

قطر ساقه در محل اتصال برگ سوم از سطح بستر توسط کولیس دیجیتالی با دقت ۰/۰۱ میلی‌متر اندازه‌گیری شد. طول ساقه نیز از سطح بستر تا انتهای بلندترین برگ گیاه توسط خط‌کش اندازه‌گیری شد.

تعیین عناصر معدنی

جهت اندازه‌گیری عناصر غذایی کلسیم، فسفر، پتاسیم، نیتروژن و سلنیوم در برگ کلم کیل، ۰/۵ گرم از نمونه برگ را خشک و سپس آسیاب و وزن کرده و آنگاه در کوره الکتریکی با دمای ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳ ساعت قرار داده شد تا نمونه‌ها تبدیل به خاکستر شوند و سپس اسید کلریدریک ۲ نرمال به نمونه‌ها اضافه شده و در نهایت توسط آب مقطر به حجم ۵۰ میلی‌لیتر رسانیده شد. این عصاره به طور مستقیم جهت اندازه‌گیری عناصر ذکر شده به کار رفت. اندازه‌گیری نیتروژن کل به روش کجلدال با استفاده از دستگاه ISOLAB Kjeldahl, Germany (Kjeldahl, 1883)، فسفر به روش زرد مولیبدات وانادات توسط دستگاه اسپکتروفتومتر Unico UV-Vis 2100, USA (Jackson, 1973)، سلنیوم با دستگاه جذب اتمی Kopsell & Agilent AA240Z^۴ (Randle, 1997) و پتاسیم و کلسیم با استفاده از دستگاه فلیم‌فتومتر CORNING M410 (Papathanasiou et al., 2012) انجام شد.

محتوای نیترات

محتوای نیترات برگ کلم کیل به روش Cataldo et al., (1975) با تغییرات جزئی با استفاده از اسپکتروفتومتر اندازه‌گیری شد. بافت برگ (۰/۵ گرم) در ازت مایع پودر شد و سپس در ۱۰ میلی‌لیتر آب مقطر حل شد. نمونه به مدت ۳۰ دقیقه در حمام آب (۱۰۰ درجه سانتی‌گراد) جوشانده شد. سپس با آب شیر خنک شده و فیلتر شد و به حجم ۲۵ میلی‌لیتر با آب مقطر رسانده شد. به عصاره حاصل (۰/۱ میلی‌لیتر)، ۰/۴ میلی‌لیتر سالیسیلیک اسید غلیظ شده با اسید سولفوریک اضافه شد. پس از ۲۰ دقیقه، ۹/۵ میلی‌لیتر از محلول NaOH ۸ درصد (w/v) به عصاره اضافه شد. میزان نیترات نهایی با استفاده از میزان جذب در طول موج ۴۱۰ نانومتر بر اساس منحنی استاندارد اندازه‌گیری شد.

آنالیز آماری

تجزیه واریانس داده‌ها و مقایسه میانگین تیمارها با نرم‌افزار SAS نسخه‌ی ۹/۴ انجام شد. از آزمون حداقل اختلاف معنی‌دار^۵ برای مقایسه میانگین تیمارها استفاده شد. رسم نمودارها نیز با استفاده از نرم‌افزار Excel انجام گردید.

یافته‌های پژوهش

مقدار وزن تازه و درصد ماده خشک برگ

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۳) نشان داد که اثر ساده محلول غذایی و محلول پاشی سلنیوم در سطح احتمال ۱ درصد ($p < 0/01$) بر وزن تازه و درصد ماده خشک برگ‌های کلم کیل معنی‌دار بوده، ولی اثر متقابل محلول غذایی و سلنیوم معنی‌دار نبوده است. مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که بیشترین وزن تازه کل برگ‌ها به مقدار ۳۸۳/۶۳ گرم در محلول غذایی سه بدست آمد (شکل ۱-الف). با افزایش سطح سلنیوم تا ۱۰ میلی‌گرم در لیتر وزن تازه کل برگ‌ها روند افزایشی داشت، ولی پس از آن و افزایش سطح سلنیوم به ۱۵ میلی‌گرم در لیتر وزن تازه کل برگ‌ها کاهش یافت (شکل ۱-ب).

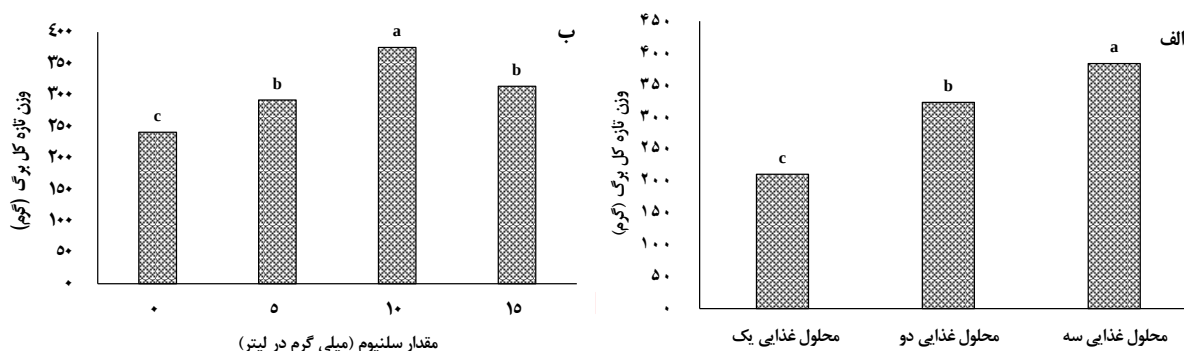
^۴ - Shimadzu-AA670

^۵ - Least Significant Difference (LSD)

جدول ۳. نتایج تجزیه واریانس اثر محلول غذایی و محلول پاشی سلیوم بر صفات مورفولوژی کلم کیل.

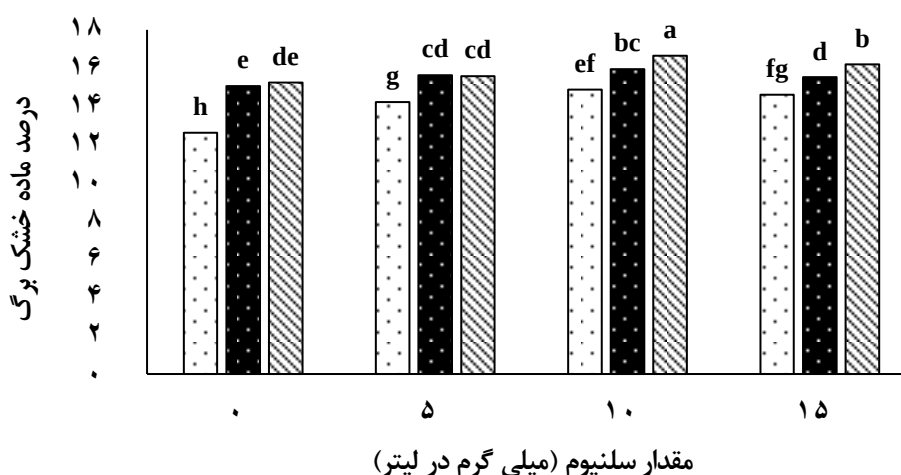
منابع تغییرات	درجه آزادی	وزن تازه کل برگ	درصد ماده خشک کل برگ	تعداد برگ	وزن تازه ساقه	درصد ماده خشک ساقه	طول ساقه	قطر ساقه
محلول غذایی	۲	۳۷۰۹۸۶/۹**	۴۴/۹۹**	۳۲۱/۷۱**	۵۳۵/۱۷**	۶/۰۱**	۴۴/۲۸**	۰/۳۲۵**
سلیوم	۳	۱۱۲۳۷۲/۲**	۱۴/۹۸**	۵۸/۲۹**	۱۵۵۲/۳۴**	۱۴/۳۲**	۱۱۴/۹۳**	۰/۲۳۷**
محلول غذایی × سلیوم	۶	۴۴۰۶/۳ ^{NS}	۱/۸۵*	۶/۲۶ ^{NS}	۲۱/۲۳**	۰/۶۱**	۴/۲۴*	۰/۰۰۷ ^{NS}
اشتباه آزمایشی	۶۰	۳۰۳۷/۹	۰/۲۴	۳/۲۴	۵/۰۱	۰/۱۸	۱/۳۸	۰/۰۰۹
ضریب تغییرات (%)	-	۱۸/۱۴	۳/۲۵	۸/۶۲	۶/۶۸	۲/۶۴	۷/۷۳	۶/۵۹

*, ** و ^{NS} به ترتیب معنی داری در سطح احتمال ۵، ۱ درصد و عدم معنی داری.



شکل ۱. مقایسه میانگین اثر محلول غذایی و مقدار سلیوم بر وزن تازه کل برگ‌های هر بوته کلم کیل (میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک با هم اختلاف معنی داری ندارند).

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۳) نشان داد که اثر ساده محلول غذایی و محلول پاشی سلیوم در سطح احتمال ۱ درصد و اثر متقابل این دو عامل در سطح احتمال ۵ درصد بر درصد ماده خشک کل برگ‌ها معنی دار بود. مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که بیشترین و کمترین مقدار درصد ماده خشک کل برگ‌ها با مقادیر ۱۶/۶۵ و ۱۲/۶۲ درصد به ترتیب در محلول غذایی سه و سطح ۱۰ میلی گرم در لیتر سلیوم و محلول غذایی یک و سطح صفر سلیوم بدست آمد (شکل ۲).

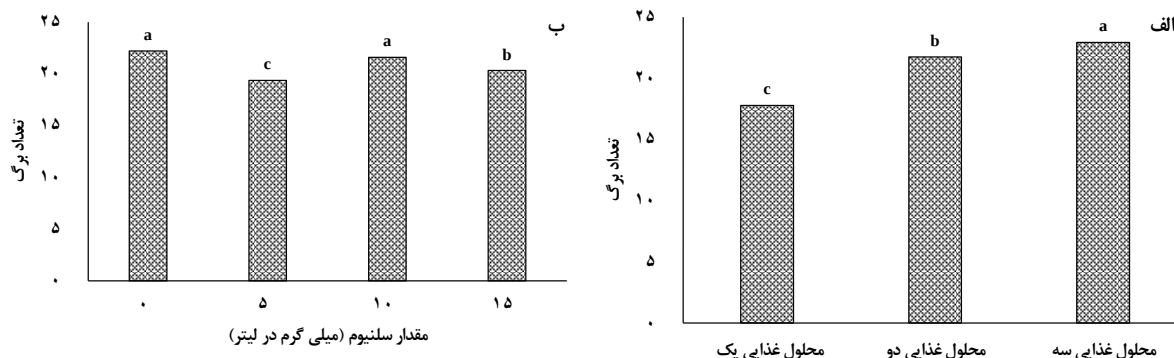


□ محلول غذایی یک ■ محلول غذایی دو ▨ محلول غذایی سه

شکل ۲. مقایسه میانگین اثر متقابل محلول غذایی و سلیوم بر درصد ماده خشک کل برگ‌های هر بوته کلم کیل (میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک با هم اختلاف معنی داری ندارند).

تعداد برگ

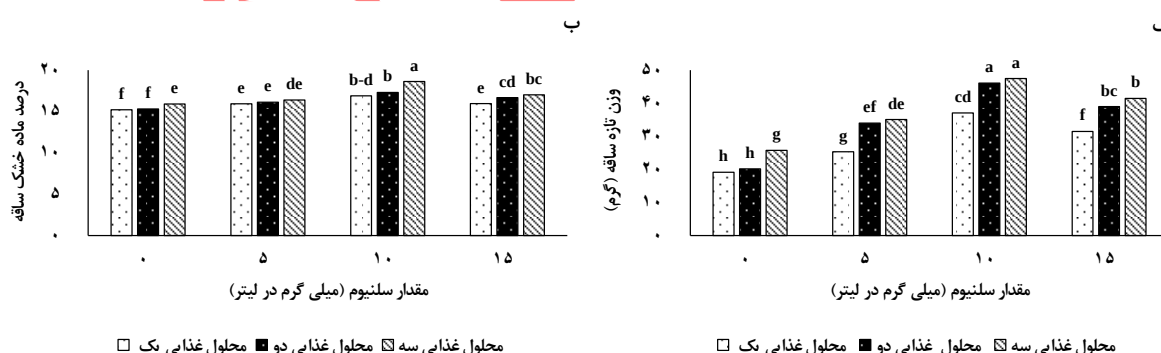
بر اساس نتایج تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۳) اثر ساده محلول غذایی و محلول پاشی سلینیوم در سطح احتمال ۱ درصد بر تعداد برگ کلم کیل معنی‌دار بوده، ولی اثر متقابل این دو عامل معنی‌دار نبوده است. مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که بیشترین تعداد برگ در محلول غذایی سه (شکل ۳ الف) و سطح صفر و ۱۰ میلی گرم در لیتر سلینیوم (شکل ۳ ب) بدست آمد، در حالی که کمترین تعداد برگ در محلول غذایی یک و سطح ۵ میلی گرم در لیتر سلینیوم بدست آمد.



شکل ۳. مقایسه میانگین اثر محلول غذایی و سلینیوم بر تعداد برگ هر بوته کلم کیل (میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک با هم اختلاف معنی‌داری ندارند).

مقدار وزن تازه و درصد ماده خشک ساقه

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۳) نشان داد که اثر ساده محلول غذایی و محلول پاشی سلینیوم و اثر متقابل این دو عامل در سطح احتمال ۱ درصد بر مقدار وزن تازه و درصد ماده خشک ساقه کلم کیل معنی‌دار بوده است. مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که بیشترین وزن تازه ساقه در محلول‌های غذایی دو و سه و سطح ۱۰ میلی گرم در لیتر سلینیوم بدست آمد، در حالی که کمترین مقدار وزن تازه ساقه در محلول یک و سطح صفر سلینیوم بدست آمد (شکل ۴-الف). همچنین بیشترین درصد ماده خشک ساقه در محلول غذایی سه و سطح ۱۰ میلی گرم در لیتر سلینیوم بدست آمد، در حالی که کمترین درصد ماده خشک ساقه در محلول یک و سطح صفر سلینیوم بدست آمد (شکل ۴-ب).

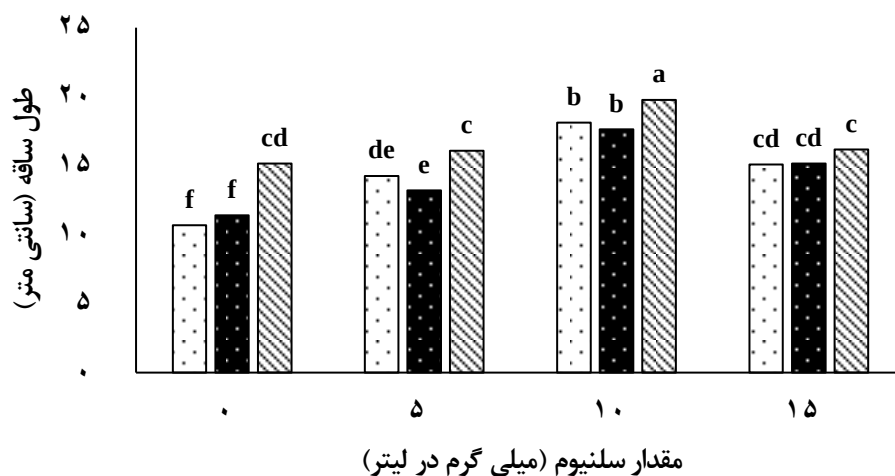


شکل ۴. مقایسه میانگین اثر متقابل محلول غذایی و سلینیوم بر وزن تر و خشک ساقه هر بوته کلم کیل (میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک با هم اختلاف معنی‌داری ندارند).

طول و قطر ساقه

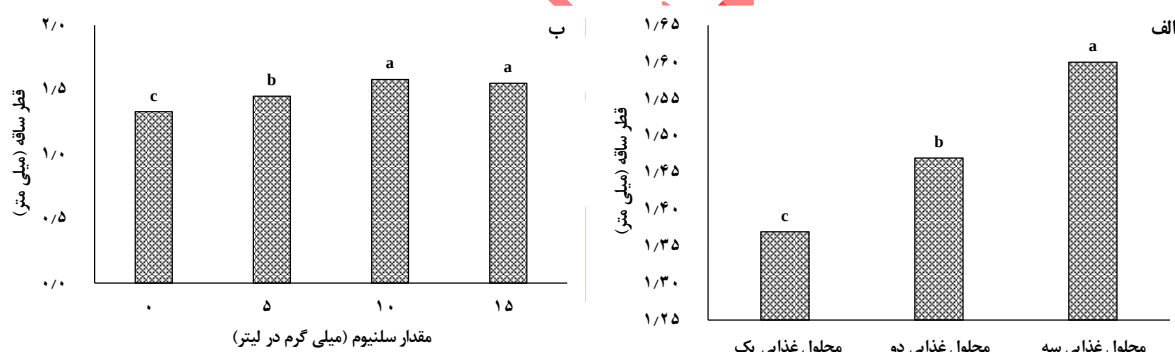
بر اساس نتایج تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۳)، اثر ساده محلول غذایی و محلول پاشی سلینیوم در سطح احتمال ۱ درصد بر طول و قطر ساقه کلم کیل معنی‌دار بود. اثر متقابل محلول غذایی و سلینیوم نیز در سطح احتمال ۵ درصد بر طول ساقه معنی‌دار بود، ولی تاثیر معنی‌داری بر قطر ساقه نداشت. مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که بیشترین طول ساقه (۱۹/۷۵ سانتی‌متر) در محلول غذایی سه و سطح ۱۰ میلی گرم در لیتر سلینیوم بدست آمد، در حالی که کمترین مقدار طول ساقه (۱۰/۶۸ سانتی‌متر) در محلول

غذایی یک و سطح صفر سلیوم بدست آمد (شکل ۵). بر اساس نتایج مقایسه میانگین داده‌ها، بیشترین قطر ساقه به مقدار ۱/۶ و ۱/۵۸ میلی‌متر به ترتیب در محلول غذایی سه (شکل ۶ الف) و سطح ۱۰ میلی‌گرم در لیتر سلیوم (شکل ۶ ب) بدست آمد.



□ محلول غذایی یک ■ محلول غذایی دو ▨ محلول غذایی سه

شکل ۵. مقایسه میانگین اثر متقابل محلول غذایی و سلیوم بر طول ساقه هر بوته کلم کیل (میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک با هم اختلاف معنی‌داری ندارند).



شکل ۶. مقایسه میانگین اثر محلول غذایی و سلیوم بر قطر ساقه هر بوته کلم کیل (میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک با هم اختلاف معنی‌داری ندارند).

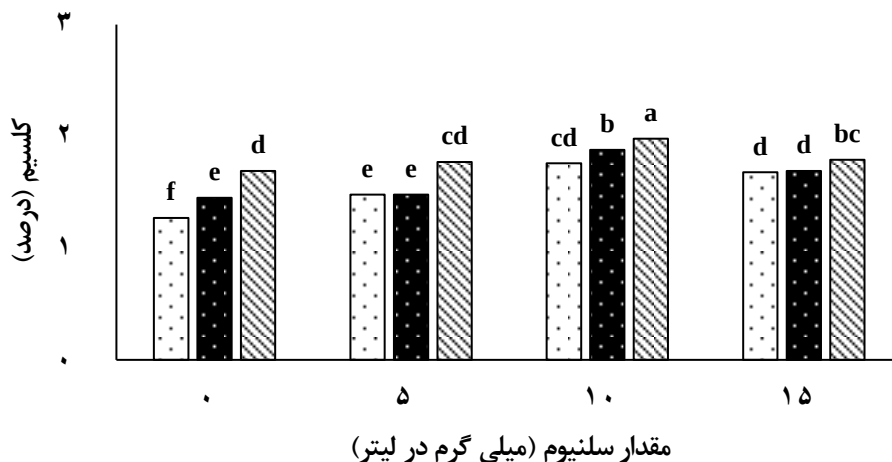
مقدار کلسیم برگ

بر اساس نتایج تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۴)، اثر ساده محلول غذایی و محلول پاشی سلیوم و اثر متقابل این دو عامل در سطح احتمال ۱ درصد بر مقدار کلسیم کلم کیل معنی‌دار بوده است. مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که بیشترین مقدار کلسیم در محلول غذایی سه و سطح ۱۰ میلی‌گرم در لیتر سلیوم به مقدار ۱/۹۸ درصد بدست آمد، در حالی که کمترین مقدار کلسیم در محلول یک و سطح صفر سلیوم بدست آمد (شکل ۷).

جدول ۴. نتایج تجزیه واریانس اثر محلول غذایی و محلول پاشی سلیوم بر عناصر معدنی کلم کیل.

منابع تغییرات	درجه آزادی	کلسیم	سلیوم	پتاسیم	فسفر	نیترژن	نیترات
محلول غذایی	۲	۰/۲۰۹**	۴۵۲/۷**	۲/۵۱**	۰/۱۰۳**	۱/۱۷**	۰/۶۱۶**
سلیوم	۳	۰/۲۷۸**	۵۵۹۴/۹**	۲/۴۹**	۰/۰۴**	۰/۲۷۴**	۰/۰۶**
محلول غذایی × سلیوم	۶	۰/۰۱۷**	۹۷/۸۷**	۰/۰۵۹ ^{NS}	۰/۰۰۳**	۰/۰۳۴**	۰/۰۰۷ ^{NS}
اشتباه آزمایشی	۲۴	۰/۰۰۳	۱/۵۵	۰/۰۴۶	۰/۰۰۰۰۹	۰/۰۰۷	۰/۰۰۲
ضریب تغییرات (%)	-	۳/۳۱	۳/۲۶	۷/۹۳	۰/۵۵	۲/۰۰	۹/۲۴

*, **, *** به ترتیب معنی‌داری در سطح احتمال ۵ و ۱ درصد و عدم معنی‌داری.

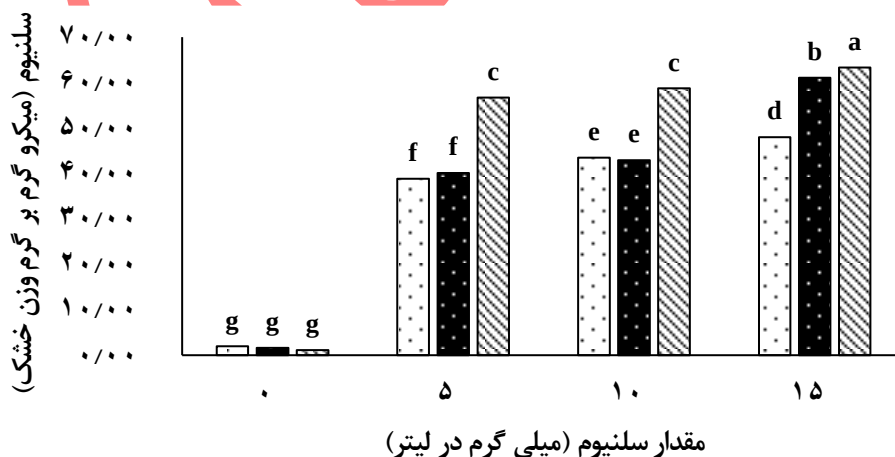


□ محلول غذایی یک ■ محلول غذایی دو ▨ محلول غذایی سه

شکل ۷. مقایسه میانگین اثر متقابل محلول غذایی و سلنیوم بر مقدار کلسیم برگ کلم کیل (میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک با هم اختلاف معنی‌داری ندارند).

مقدار سلنیوم برگ

بر اساس نتایج تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۴)، اثر ساده محلول غذایی و محلول پاشی سلنیوم و اثر متقابل این دو عامل در سطح احتمال ۱ درصد بر مقدار سلنیوم برگ کلم معنی‌دار بوده است. مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که بیشترین مقدار سلنیوم در محلول غذایی ۳ و سطح ۱۵ میلی‌گرم در لیتر سلنیوم به مقدار ۶۳/۳۳ میکروگرم در گرم وزن خشک بدست آمد، در حالی که کمترین مقدار سلنیوم در همه محلول‌ها و سطح صفر سلنیوم بدست آمد (شکل ۸).

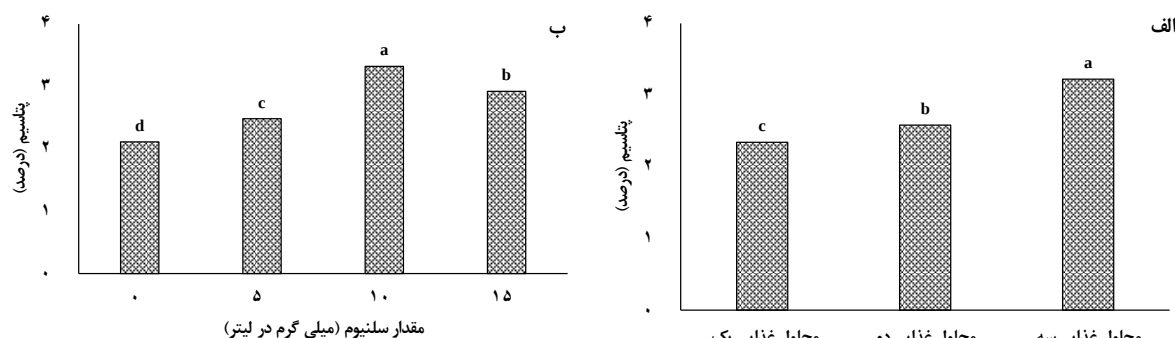


□ محلول غذایی یک ■ محلول غذایی دو ▨ محلول غذایی سه

شکل ۸. مقایسه میانگین اثر متقابل محلول غذایی و سلنیوم بر مقدار سلنیوم برگ کلم کیل (میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک با هم اختلاف معنی‌داری ندارند).

مقدار پتاسیم برگ

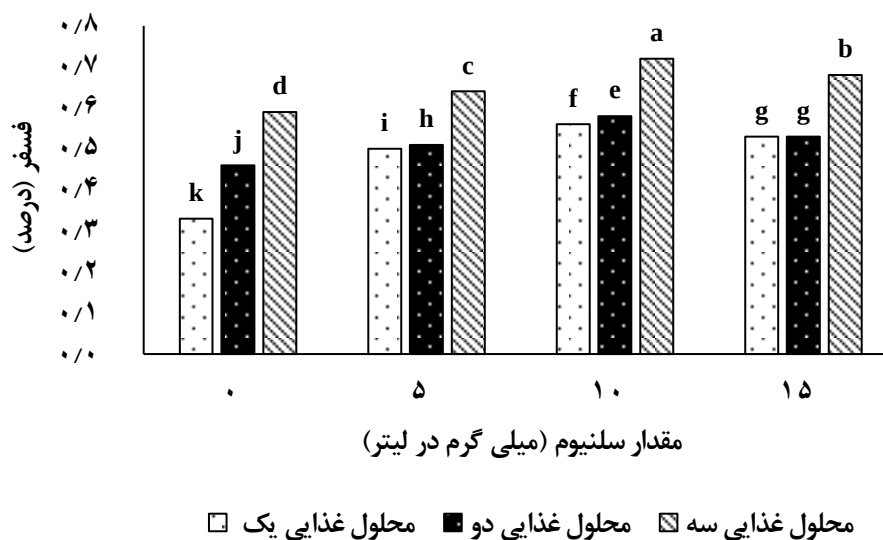
بر اساس نتایج تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۴)، اثر ساده محلول غذایی و محلول پاشی سلیوم در سطح احتمال ۱ درصد بر مقدار پتاسیم کلم کیل معنی‌دار بود، ولی اثر متقابل این دو عامل معنی‌دار نبود. مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که بیشترین مقدار پتاسیم در محلول غذایی سه (شکل ۹ الف) و سطح ۱۰ میلی گرم در لیتر سلیوم (شکل ۹-ب) بدست آمد، در حالی که کمترین مقدار پتاسیم در محلول غذایی یک و سطح صفر سلیوم بدست آمد.



شکل ۹. مقایسه میانگین اثر محلول غذایی و سلیوم بر مقدار پتاسیم برگ کلم کیل (میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک با هم اختلاف معنی‌داری ندارند).

فسفر

بر اساس نتایج تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۴)، اثر ساده محلول غذایی و محلول پاشی سلیوم و اثر متقابل این دو عامل در سطح احتمال ۱ درصد بر مقدار فسفر کلم کیل معنی‌دار بوده است. مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که بیشترین مقدار فسفر در محلول غذایی سه و سطح ۱۰ میلی گرم در لیتر سلیوم به مقدار ۰/۷۲ درصد بدست آمد، در حالی که کمترین مقدار فسفر در محلول یک و سطح صفر سلیوم بدست آمد (شکل ۱۰).

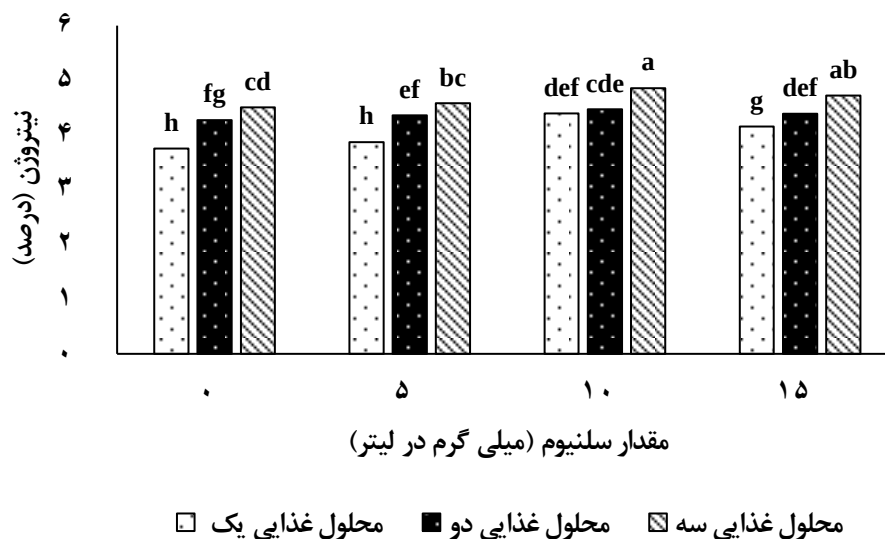


شکل ۱۰. مقایسه میانگین اثر متقابل محلول غذایی و سلیوم بر مقدار فسفر برگ کلم کیل (میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک با هم اختلاف معنی‌داری ندارند).

مقدار نیتروژن برگ

بر اساس نتایج تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۴)، اثر ساده محلول غذایی و محلول پاشی سلیوم و اثر متقابل این دو عامل در سطح احتمال ۱ درصد بر مقدار نیتروژن کلم کیل معنی‌دار بوده است. مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که بیشترین مقدار نیتروژن در

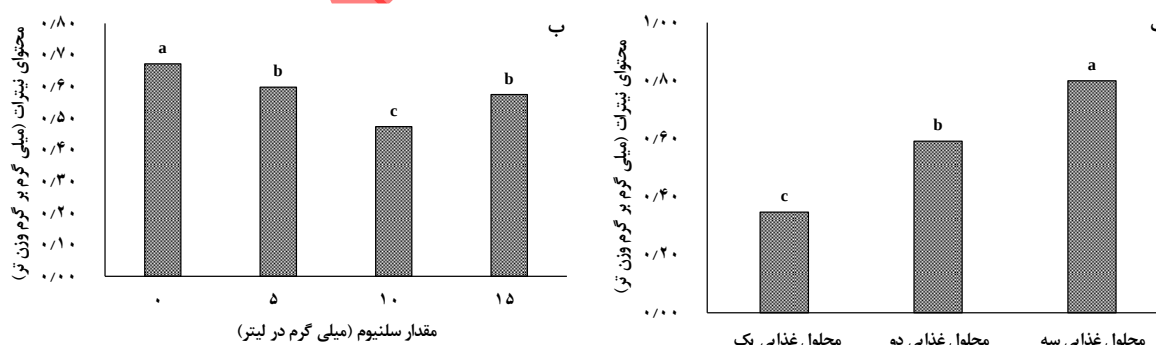
محلول غذایی سه و سطح ۱۰ میلی گرم در لیتر سلیوم به مقدار ۴/۸۵ درصد بدست آمد، در حالی که کمترین مقدار نیتروژن در محلول غذایی یک و سطح صفر و ۵ میلی گرم در لیتر سلیوم بدست آمد (شکل ۱۱).



شکل ۱۱. مقایسه میانگین اثر متقابل محلول غذایی و سلیوم بر مقدار نیتروژن برگ کلم کیل (میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک با هم اختلاف معنی داری ندارند).

مقدار نیترات برگ

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۴) نشان داد که اثر ساده محلول غذایی و محلول پاشی سلیوم در سطح احتمال ۱ درصد معنی دار بود ولی اثر متقابل این دو عامل اثر معنی داری بر مقدار نیترات کلم کیل نداشت. مقایسه میانگین داده‌ها نشان داد که بیشترین مقدار نیترات (۰/۷۹ میلی گرم بر گرم وزن تر) که این مقدار کمتر از سطح توصیه شده توسط کمیسیون اروپا (UKMAFF, 1997) است) در محلول غذایی سه و کمترین آن در محلول یک (۰/۳۹ میلی گرم بر گرم وزن تر) به دست آمد (شکل ۱۲-الف). همچنین مشخص شد که سطح شاهد یا صفر میلی گرم در لیتر سلیوم موجب بیشترین مقدار نیترات (۰/۶۷ میلی گرم بر گرم وزن تر) و سطح ۱۰ کمترین میزان نیترات (۰/۴ میلی گرم بر گرم وزن تر) در گیاهان کیل شد.



شکل ۱۲. مقایسه میانگین اثر محلول غذایی و سلیوم بر مقدار پتاسیم برگ کلم کیل (میانگین‌های دارای حداقل یک حرف مشترک با هم اختلاف معنی داری ندارند).

بحث

درشت مغذی‌ها و ریز مغذی‌ها عناصر ضروری هستند که هر یک نقش ویژه‌ای در رشد و نمو گیاهان به عهده دارند (De Brito et al., 2019). در میان درشت مغذی‌ها، کلسیم به عنوان یک یون دو ظرفیتی جذب می‌شود و برای رشد ریشه بسیار مهم است، زیرا برای انتقال و ذخیره کربوهیدرات‌ها و پروتئین‌ها ضروری است. از آنجایی که در داخل گیاه کم تحرک است، یک علامت

رایج آن کلروز بین رگبرگی در برگ‌های جوان است. علائم دیگری مانند ریزش گل و کاهش رشد ریشه نیز ممکن است رخ دهد (Michalovicz *et al.*, 2019). کلسیم یکی از مهم‌ترین عناصر غذایی در گیاهان است که نقش مهمی در حفظ پایداری دیواره‌ها و غشاهای سلول و همچنین رشد آن‌ها ایفا می‌کند (Moallaye Mazraei *et al.*, 2020). نتایج این پژوهش نشان داد که افزایش نیتрат و کلسیم در محلول غذایی سه موجب افزایش وزن تر و درصد ماده خشک برگ‌های کلم کیل شد. Vakili & Zamani, (2022) گزارش دادند که محلول غذایی N3 که در آن مقدار کلسیم، نیتروژن و پتاسیم نسبت به دو محلول N1 و N2 افزایش یافته بود، می‌تواند با افزایش رشد اندام هوایی و ریشه گیاه برای تولید کاهو در کشت آبکشت برای دستیابی به عملکرد بیشینه محصول مورد استفاده قرار گیرد. افزایش نیتروژن و کلسیم محلول غذایی موجب انتقال این عناصر به سمت مریستم‌های در حال رشد شده و نیاز گیاه به تقسیم سلولی و تولید برگ را برطرف نموده و در غلظت‌های بیشتر می‌تواند موجب گسترش سطح برگ شوند (Ayala-Arreola *et al.*, 2008). کلسیم اثر قابل توجهی بر تعداد برگ و کیفیت سبزی دارد، همانطور که قبلاً توسط Gustiar *et al.*, (2020) اشاره شده است، محتوای کلسیم در گیاهان را می‌توان با استفاده از کودها یا محلول‌های غذایی با غلظت کلسیم بالاتر افزایش داد. با این حال، اجتناب از مصرف بیش از حد کلسیم مهم است، زیرا کلسیم می‌تواند برای گیاهان سمی باشد. نتایج ما نشان داد که افزایش نیترات و کلسیم محلول غذایی در محلول سه موجب افزایش وزن تر و درصد ماده خشک ساقه و طول و قطر ساقه کلم کیل می‌شود. افزایش نیترات و کلسیم محلول غذایی موجب مساعد شدن شرایط برای افزایش فتوسنتز و جذب عناصر غذایی می‌شود و افزایش قطر و طول ساقه در حضور کلسیم مشاهده می‌شود. به نظر می‌رسد با افزایش غلظت کلسیم در محلول غذایی، غلظت کلسیم در اندام هوایی افزایش می‌یابد و با توجه به تاثیر کلسیم در افزایش استحکام دیواره سلول، افزایش قطر را به دنبال خواهد داشت. کلسیم یک درشت مغذی مهم برای رشد، نمو و تولید گیاهان است که به طور مستقیم با ساختار، پایداری و تنظیم دیواره و غشای سلول در ارتباط است و برای فرآیندهای تقسیم سلول و فعال شدن چندین آنزیم ضروری می‌باشد (Buchanan *et al.*, 2015). افزایش وزن تازه و درصد ماده خشک ساقه گیاه گوجه‌فرنگی در اثر افزایش سطح کلسیم محلول غذایی تا ۱۰ میلی‌مولار توسط Tanveer *et al.*, (2020) گزارش شده است. پاسخ محرک رشد به سلیوم برای برخی از گونه‌های *Brassica* مانند کلم بروکلی (Ghasemi *et al.*, 2016) و کلزا (Hajiboland & Keivanfar, 2012) گزارش شده است. محلول پاشی سلیوم در کلم بروکلی باعث افزایش عملکرد ۳۹ درصدی تحت ۱۰ میلی گرم در لیتر محلول سلیوم و ۲۵ درصدی با کاربرد ۱۰۰ میلی گرم در لیتر شد (Ghasemi *et al.*, 2016). در پژوهش حاضر نیز سلیوم تاثیر مثبتی بر اکثر فاکتورهای رشد از جمله وزن تازه و درصد ماده خشک برگ داشت. با این حال، تعداد برگ تحت تیمارهای مختلف سلیوم روندی متفاوت از سایر فاکتورهای رشد نشان داد، که احتمالاً به تاثیر سلیوم بر تنظیم هورمونی و نحوه تخصیص منابع فتوسنتزی در گیاه مربوط می‌شود. در تیمار شاهد، تعداد برگ‌ها بیشتر از سایر سطوح سلیوم بود، اما سطح برگ (در این مقاله گزارش نشده است) کمتر بود. این مشاهده نشان می‌دهد که در غیاب سلیوم، منابع فتوسنتزی به جای افزایش اندازه‌ی برگ‌ها، بیشتر به تشکیل برگ‌های جدید اختصاص یافته است. همچنین، در این تیمار طول ساقه کمتری نسبت به تیمار با ۵ میلی گرم سلیوم مشاهده شد. این تغییرات ممکن است به دلیل تاثیر سلیوم بر تعادل هورمونی اکسین و سیتوکینین باشد. در غلظت ۵ میلی گرم بر لیتر سلیوم، افزایش بیوستن اکسین باعث رشد بیشتر جوانه انتهایی شده و در نتیجه، رشد جوانه‌های جانبی و تولید برگ‌های جدید کاهش می‌یابد. این تغییرات احتمالاً به دلیل تاثیر سلیوم بر مسیرهای بیوستنزی و انتقال اکسین است (Jia *et al.*, 2018). مطالعات پیشین نشان داده‌اند که سلیوم در غلظت‌های پایین می‌تواند بیان ژن‌های YUCCA و ژن‌های انتقال‌دهنده اکسین، مانند PIN FORMED، را افزایش دهد و از طریق تنظیم مسیرهای اکسین، رشد گیاه را تحت تاثیر قرار دهد (Jia *et al.*, 2018). قندها به عنوان بستر متابولیکی و مولکول‌های سیگنال‌دهنده در مسیرهای مختلف عمل می‌کنند (Mishra *et al.*, 2009; Ruan, 2014). در تحقیقات

پیشین اشاره شده است که گلوکز می‌تواند بر بیان ژن‌های مرتبط با بیوسنتز و انتقال اکسین تأثیر بگذارد (Sairanen et al., 2012; Yuan et al., 2013). همچنین، تحقیقات نشان داده‌اند که سلیوم می‌تواند غلظت گلوکز و اسیدهای آمینه را در *Brassica napus* افزایش دهد (Dimkovikj & Van Hoewyk, 2014). بنابراین، ممکن است سلیوم در سطح ۵ میلی گرم بر لیتر از طریق افزایش بیوسنتز قندهای محلول نیز، موجب تغییراتی در سطح اکسین گیاه شده و تعداد برگ‌ها را تحت تأثیر قرار دهد. در تیمار ۱۰ میلی گرم بر لیتر سلیوم، تعداد برگ‌ها نسبت به شاهد کاهش نیافت و علاوه بر آن افزایش وزن تازه و سطح برگ نیز مشاهده شد. این تغییرات در این سطح از سلیوم، ممکن است نشانگر این باشد که تعادل بهتری میان اکسین و سیتوکینین برقرار شده است، که منجر به افزایش ماده تازه و سطح برگ شده و همزمان از کاهش تعداد برگ‌ها جلوگیری کرده است. همچنین، در این تیمار، تولید آنتی‌اکسیدان‌ها (در این پژوهش گزارش نشده است) افزایش یافته و رشد گیاه بهبود یافته است، که ممکن است عاملی در افزایش تعداد برگ‌ها باشد. محلول‌پاشی سلیوم راه مناسبی برای افزایش میزان سلیوم گیاهان رشد یافته در خاک‌هایی است که محتوای سلیوم پایینی دارند (Fernandes et al., 2014). نقش مفیدی که این عنصر در گیاهان بازی می‌کند با افزایش رشد گیاهان و کاهش خسارات وارده به گیاهان ناشی از تنش‌های زیستی و غیرزیستی است. بر اساس تحقیقات، غلظت‌های پایین سلیوم اثر سودمندی بر متابولیسم سلول‌های گیاهی دارد و با توجه به شواهد کاربرد خاکی یا محلول‌پاشی سلیوم می‌تواند رشد عملکرد و کیفیت محصولات را افزایش دهد (Cheng et al., 2023; Beyranvand et al., 2023). گزارش دادند که سلیوم در رژیم‌های مختلف آبیاری در غلظت‌های پایین باعث بهبود رشد رویشی و زایشی گیاهان سلوی زینتی شد اما در غلظت‌های بالاتر تأثیر منفی بر پارامترهای مذکور داشت. همچنین Shamsabadi et al., (2023) گزارش دادند که محلول‌پاشی برگی سلیوم به میزان ۵ میلی گرم بر لیتر، موجب افزایش خصوصیات رشد و نیز افزایش تحمل گیاه نعنای فلفلی در برابر تنش شوری و خشکی گردید.

بهبود عملکرد تغذیه یکی از ضروری‌ترین اهداف کشاورزی مدرن است. در این راستا، عمل تقویت زیستی سبزی‌ها با عناصر ضروری ماکرو و میکرو به دلیل امکان بهینه‌سازی تغذیه انسان و تحریک رشد و نمو گیاهان، محبوبیت روزافزونی پیدا کرده است (Buturi et al., 2021). برخلاف خاک، یون‌های مغذی از طریق انتشار به سطح ریشه برای جذب در آبکشت تحویل داده می‌شوند. فرکانس و مدت تماس بین ریشه‌ها و یون‌های غذایی تأثیر قابل توجهی بر توانایی ریشه در جذب مواد غذایی دارد (Baiyin et al., 2021). نتایج ما نشان داد که محلول سه که دارای کلسیم و نیترات بیشتری نسبت به محلول‌های دیگر بود، منجر به بیشترین مقدار عناصر کلسیم، پتاسیم، نیتروژن، فسفر و نیترات در کلم کیل شد. در رابطه با برهم‌کنش نیترات و کلسیم، نتایج متناقضی گزارش شده است، اما در اکثر مطالعات این رابطه به عنوان یک تعامل هم‌افزایی شناخته شده است (Millikan et al., 1969; Eckerson et al., 1924). مقدار بالاتر نیترات در گیاهان تغذیه شده با محلول سه، با یافته‌های سایر محققان که نشان می‌دهد افزایش عرضه نیترات منجر به افزایش تجمع آن در اندام‌های گیاه می‌شود، مطابقت دارد (chen et al., 2004; Darnell et al., 2001). سلیوم به دلیل اثرات مفید قابل توجهی که بر سلامت انسان دارد، مانند محافظت در برابر بیماری‌های ویروسی و قلبی عروقی و سرطان و همچنین توانایی آن در بهبود مقاومت گیاه در برابر انواع تنش‌ها، یکی از جذاب‌ترین عناصر است (Schiavon et al., 2020). نتایج ما نشان داد که محلول‌پاشی سلیوم بخصوص در سطح ۱۰ ppm موجب بهبود و افزایش سطح عناصر ماکرو در کلم کیل شد. گزارش شده است که کلم‌ها می‌توانند سلیوم را در خود انباشته کنند و با محلول‌پاشی سلیوم انباشت سلیوم افزایش می‌یابد (Yu et al., 2023). به طور ضمنی می‌توان از کلم به عنوان ماده خام برای تولید محصولات غنی از سلیوم استفاده کرد. تأثیر سلیوم بر افزایش مواد معدنی در کلم کیل توسط Kucukyumuk & Suarez, (2021) و Tavan et al., (2024) گزارش شده است. کاربرد سلیوم هم عملکرد و هم ترکیب غذایی کلم بروکلی را در برداشت‌های اولیه بهبود بخشید و گلچه‌های کمتر اما سنگین‌تر و غنی‌تر از مواد مغذی تولید می‌کنند (Poblaciones & Broadley, 2022). در گیاه گندم محلول - پاشی سلیوم به طور قابل توجهی محتوای سلیوم گیاه را افزایش داد و جذب آهن را بهبود بخشید، در حالی که تجمع روی را

کاهش داد و بر محتوای کلسیم تأثیری نداشت (Nawaz et al., 2015). همچنین افزایش معنی‌دار غلظت روی، کلسیم و منیزیم در هر دو رقم گندم در اثر محلول‌پاشی سلیوم توسط Xia et al., (2020) گزارش شده است. یافته‌های ما نشان داد که افزایش غلظت سلیوم تا ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر باعث کاهش تجمع نیترات در کلم کیل شد، اما در سطح ۱۵ میلی‌گرم بر لیتر مجدداً افزایش نشان داد. برخی مطالعات نشان داده‌اند که افزودن سلیوم به گیاهان می‌تواند بر متابولیسم نیتروژن در گیاهان تأثیرگذار باشد اما این تأثیر وابسته به میزان غلظت سلیوم است (Bian et al., 2020; Kaiser et al., 1984). در همین راستا Sung & Chen (2018) در آزمایشی اثر سلیوم را بر متابولیسم نیتروژن کلم پاک‌چوی (*Brassica chinensis*) بررسی کردند و دریافتند که سلیوم باعث افزایش فعالیت‌های آنزیمی مورد بررسی، از جمله نیترات ردوکتاز، گلوتامین سنتتاز و گلوتامات سنتتاز شد. آسیمیلایسیون نیترات در برگ‌ها، وابسته به عملکرد آنزیم نیترات ردوکتاز برای تبدیل نیترات به نیتريت و سپس نیتريت ردوکتاز برای احیای نیتريت به آمونیوم است. آمونیوم تولید شده نیز از طریق مسیر آنزیم‌های گلوتامین سنتتاز و گلوتامات سنتتاز در متابولیسم نیتروژن گیاه مورد استفاده قرار می‌گیرد. عملکرد این مسیر بستگی به تولید گلوتامات دارد که منبع کربن و انرژی در بیوسنتز بسیاری از اسیدهای آمینه می‌باشد. بنابراین آسیمیلایسیون نیترات علاوه بر این که با فعالیت آنزیم نیترات ردوکتاز تنظیم می‌شود، تحت تأثیر متابولیت‌هایی مثل نیتريت و آمونیوم نیز قرار دارد. در نتیجه به‌طور غیرمستقیم تحت تأثیر فعالیت آنزیم‌های نیتريت ردوکتاز و گلوتامین سنتتاز نیز هست (Forde & Lea, 2007). همانطور که اشاره شد، تأثیر سلیوم بر فعالیت آنزیم‌های دخیل در متابولیسم نیتروژن، بستگی به غلظت سلیوم به کار رفته دارد. هر چند سمیت سلیوم در غلظت‌های بالا برای گیاهان کاملاً محرز بوده و نوعی تنش محسوب می‌گردد ولی اثر مثبت غلظت‌های پایین سلیوم در حفاظت گیاهان در مقابل گونه‌های فعال اکسیژن و فعال‌سازی مکانیسم‌های کاهش تنش اکسیداتیو در پژوهش‌های متفاوتی گزارش شده است (Seppanen et al., 2003). Ruiz et al., (2007) نیز گزارش کردند که سلیوم در غلظت‌های بالا اثر سمی بر آنزیم نیتريت ردوکتاز دارد و باعث کاهش فعالیت این آنزیم می‌شود. کاربرد سلیوم می‌تواند ظرفیت فتوسنتزی گیاهان را افزایش دهد (Feng et al., 2013; Zhang et al., 2014). ظرفیت فتوسنتزی در گیاهان نقش مهمی در متابولیسم و تجمع نیترات دارد. کاهش نیترات در گیاه ارتباط مثبتی با محصولات فتوسنتز مانند کربوهیدرات‌ها دارد (Bian et al., 2016). زیرا این ترکیبات می‌توانند اسکلت کربنی و انرژی لازم برای متابولیسم نیتروژن در گیاهان را فراهم کنند (Champigny, 1995). بنابراین فرض بر این است که کاربرد سلیوم علاوه بر تأثیر بر فعالیت آنزیم‌های درگیر در متابولیسم نیتروژن، از طریق حفظ ظرفیت فتوسنتز نیز به کاهش تجمع نیترات در گیاه کمک می‌کند. بر همین اساس، افزایش تجمع نیترات در سطح ۱۵ میلی‌گرم بر لیتر سلیوم، احتمالاً به کاهش ظرفیت فتوسنتزی گیاه نسبت به سطح ۱۰ میلی‌گرم بر لیتر، مرتبط است. این کاهش می‌تواند کارایی متابولیسم نیتروژن را تحت تأثیر قرار داده و در نهایت، منجر به افزایش مجدد تجمع نیترات شود.

نتیجه‌گیری کلی

روش‌های غنی‌سازی زیستی فواید سریعی برای غلبه بر کمبود عناصر ریزمغذی در جمعیت‌هایی با دریافت رژیم غذایی ناکافی ارائه می‌دهند. نتایج ما نشان داد که حداکثر مقدار صفات مورفولوژی و عناصر معدنی در گیاهان کلم کیل رشد یافته در محلول شماره سه بدست آمد که در این محلول نسبت به محلول‌های غذایی شماره یک و دو، مقدار نیترات و کلسیم افزایش یافته بود و نتایج حاکی از تأثیر مثبت افزایش کلسیم بر صفات مورفولوژی بود (کلسیم در محلول دو، ۲ برابر محلول یک و در محلول سه، ۲/۳ برابر محلول دو بوده است). علاوه بر این، محلول‌پاشی سلیوم موجب بهبود صفات مورفولوژی و جذب عناصر در کلم کیل شد و بهینه‌ترین غلظت سلیوم از نظر تأثیر بر صفات مورد مطالعه، مقدار ۱۰ ppm بود. به طور کلی یافته‌های این مطالعه می‌تواند برای توسعه محصولات جدید غنی‌شده مانند سالادها و عصاره‌های آماده و غیره مفید باشد.

منابع

بابالار، م. و کافی، م. (۱۳۸۸). زئوپونیک و تغذیه فسفری گیاهان از آپاتیت‌های ایران. *علوم باغبانی/ایران*.
بیرانوند، ف.، زاهدی، ب. و رضایی‌نژاد، ع. (۱۴۰۱). بررسی تأثیر محلول‌پاشی سلیوم بر ویژگی‌های مورفوفیزیولوژیک و بیوشیمیایی گیاه سلوی زینتی تحت رژیم‌های مختلف آبیاری. *فرآیند و کارکرد گیاهی*، ۱۱(۴۷): ۳۳۹-۳۳۳.

- شمس آبادی، و.، بانژاد، ح.، انصاری، ح. و نعمتی، ح. (۱۴۰۱). بررسی بهره‌وری آب و بعضی خصوصیات گیاه نعنای فلفلی در شرایط تنش آبی و شوری در حضور سلنیوم. مدیریت آب در کشاورزی، ۹(۲): ۱۱۵-۱۳۰.
<https://dx.doi.org/10.22034/IWRJ.2022.13964.2428>
- وکیلی، ش. و زمانی، ص. (۱۴۰۱). اثر ترکیب عناصر غذایی بر پارامترهای دو رقم کاهو در کشت هیدروپونیک با بستر جامد. نشریه علمی پژوهشی روابط خاک و گیاه، ۱۳(۳): ۶۳-۷۵.
<https://doi.org/10.47176/jspi.13.3.20651>
- Abdalla, M. A., Wick, J. E., Famuyide, I. M., McGaw, L. J., & Muhling, K. H. (2021). Selenium enrichment of green and red lettuce and the induction of radical scavenging potential. *Horticulturae*, 7(11), 488.
<https://doi.org/10.3390/horticulturae7110488>
- Ayala-Arreola, J., Castillo-González, A. M., Valdez-Aguilar, L. A., Colinas-León, M. T., Pineda-Pineda, J., & Avitia-García, E. (2008). Effect of calcium, boron and molybdenum on plant growth and bract pigmentation in poinsettia. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 31(2), 165-165.
<https://doi.org/10.35196/rfm.2008.2.165>
- Babalar, M., & Kafi, M. (2009). Zeoponic and Phosphorous Nutrition of Plants from Iranian Apatities. (In Persian)
- Baiyin, B., Tagawa, K., Yamada, M., Wang, X., Yamada, S., Yamamoto, S., & Ibaraki, Y. (2021). Effect of Substrate Flow Rate on Nutrient Uptake and Use Efficiency in Hydroponically Grown Swiss Chard (*Beta vulgaris* L. ssp. cicla 'Seiyou Shirokuki'). *Agronomy*, 11(10), 2050.
<https://doi.org/10.3390/agronomy11102050>
- Beyranvand, F., Zahedi, B., & Rezai-Najad, A. (2023). Investigating the effect of selenium foliar application on the morphophysiological and biochemical characteristics of ornamental cypress plants under different irrigation regimes. *Plant Process and Function*, 11(47): 323-339. (In Persian)
- Bian, Z. H., Cheng, R. F., Yang, Q. C., Wang, J., & Lu, C. (2016). Continuous light from red, blue, and green light-emitting diodes reduces nitrate content and enhances phytochemical concentrations and antioxidant capacity in lettuce. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 141(2), 186-195.
<https://doi.org/10.21273/JASHS.141.2.186>
- Bian, Z. H., Bo, Lei, B., Cheng, R. F., Yu, W. A. N. G., Tao, L. I., & Yang, Q. C. (2020). Selenium distribution and nitrate metabolism in hydroponic lettuce (*Lactuca sativa* L.): Effects of selenium forms and light spectra. *Journal of Integrative Agriculture*, 19(1), 133-144. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(19\)62775-9](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(19)62775-9)
- Bo, L. E. I., BIAN, Z. H., Yang, Q. C., Jun, W. A. N. G., CHENG, R. F., Kun, L. I., & TONG, Y. X. (2018). The positive function of selenium supplementation on reducing nitrate accumulation in hydroponic lettuce (*Lactuca sativa* L.). *Journal of Integrative Agriculture*, 17(4), 837-846. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(17\)61759-3](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(17)61759-3)
- Buchanan, B. B., Gruissem, W., & Jones, R. L. (Eds.). (2015). *Biochemistry and molecular biology of plants*. John Wiley & Sons.
- Buturi, C. V., Mauro, R. P., Fogliano, V., Leonardi, C., & Giuffrida, F. (2021). Mineral biofortification of vegetables as a tool to improve human diet. *Foods*, 10(2), 223. <https://doi.org/10.3390/foods10020223>
- Champigny, M. L. (1995). Integration of photosynthetic carbon and nitrogen metabolism in higher plants. *Photosynthesis Research*, 46, 117-127. <https://doi.org/10.1007/BF00020422>
- Chen, B. M., Wang, Z. H., Li, S. X., Wang, G. X., Song, H. X., & Wang, X. N. (2004). Effects of nitrate supply on plant growth, nitrate accumulation, metabolic nitrate concentration and nitrate reductase activity in three leafy vegetables. *Plant Science*, 167(3), 635-643. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2004.05.015>
- Cheng, B., Wang, C., Yue, L., Chen, F., Cao, X., Lan, Q., & Wang, Z. (2023). Selenium nanomaterials improve the quality of lettuce (*Lactuca sativa* L.) by modulating root growth, nutrient availability, and photosynthesis. *NanoImpact*, 29, 100449. <https://doi.org/10.1016/j.impact.2022.100449>
- Darnell, R. L., & Stutte, G. W. (2001). Nitrite concentration effects on NO₃-N uptake and reduction, growth, and fruit yield in strawberry. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 126(5), 560-563.
<https://doi.org/10.21273/JASHS.126.5.560>
- De Brito, R. S., Batista, J. F., do Vale Moreira, J. G., Moraes, K. N. O., & da Silva, S. O. (2019). Rochagem na agricultura: importância e vantagens para adubação complementar. *South American Journal of basic education, technical and technological*, 6(1).
- Dimkovikj, A., & Van Hoewyk, D. (2014). Selenite activates the alternative oxidase pathway and alters primary metabolism in Brassica napus roots: evidence of a mitochondrial stress response. *BMC Plant Biology*, 14, 1-15. <https://doi.org/10.1186/s12870-014-0259-6>
- do Moraes Gatti, V. C., da Silva Barata, H., Silva, V. F. A., da Cunha, F. F., de Oliveira, R. A., de Oliveira, J. T., & Silva, P. A. (2023). Influence of calcium on the development of corn plants grown in hydroponics. *AgriEngineering*, 5(1), 623-630. <https://doi.org/10.3390/agriengineering5010039>
- Feng, R., Wei, C., & Tu, S. (2013). The roles of selenium in protecting plants against abiotic stresses. *Environmental and experimental botany*, 87, 58-68.
<https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2012.09.002>

- Ferreira, R. L. U., Sena-Evangelista, K. C. M., De Azevedo, E. P., Pinheiro, F. I., Cobucci, R. N., & Pedrosa, L. F. C. (2021). Selenium in human health and gut microflora: bioavailability of seleno compounds and relationship with diseases. *Frontiers in nutrition*, 8, 685317. <https://doi.org/10.3389/fnut.2021.685317>
- Fernandes, K. F. M., Berton, R. S., & Coscione, A. R. (2014). Selenium biofortification of rice and radish: effect of soil texture and efficiency of two extractants. *Plant, Soil and Environment*, 60(3), 105-110. <https://doi.org/10.17221/823/2013-PSE>
- Forde, B. G., & Lea, P. J. (2007). Glutamate in plants: metabolism, regulation, and signalling. *Journal of Experimental Botany*, 58(9), 2339-2358. <https://doi.org/10.1093/jxb/erm121>
- Ghasemi, Y., Ghasemi, K., Pirdashti, H., & Asgharzadeh, R. (2016). Effect of selenium enrichment on the growth, photosynthesis and mineral nutrition of broccoli. *Notulae Scientia Biologicae*, 8(2), 199-203. <https://doi.org/10.15835/nsb829804>
- Gustiar, F., Munandar, M., Ningsih, S. W., & Ammar, M. (2020). Biofortification of calcium on mustard (*Brassica juncea* L.) and lettuce (*Lactuca sativa*) cultivated in floating hydroponic system. *Buletin Agroteknologi*, 1(1), 27-36. <https://doi.org/10.32663/ba.v1i1.1273>
- Hajiboland, R., & Keivanfar, N. (2012). Selenium supplementation stimulates vegetative and reproductive growth in canola (*Brassica napus* L.) plants. *Acta Agriculturae Slovenica*, 99(1), 13-19. <https://doi.org/10.14720/aas.2012.99.1.14515>
- Jackson, M.L. (1973). Soil Chemical Analysis. New Delhi: Printice-Hall of India. Privat Limited, New Delhi, Text book, pp. 144–197, 381. <https://doi.org/10.12691/aees-4-4-2>
- Jia, H., Song, Z., Wu, F., Ma, M., Li, Y., Han, D., ... & Cui, H. (2018). Low selenium increases the auxin concentration and enhances tolerance to low phosphorous stress in tobacco. *Environmental and Experimental Botany*, 153, 127-134. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2018.05.017>
- Kaiser, J. J., & Lewis, O. A. M. (1984). Nitrate reductase and glutamine synthetase activity in leaves and roots of nitrate-fed *Helianthus annuus* L. *Plant and Soil*, 77, 127-130. <https://doi.org/10.1007/BF02182818>
- Kasprzak, K., Oniszczuk, T., Wojtowicz, A., Waksmundzka-Hajnos, M., Olech, M., Nowak, R., & Oniszczuk, A. (2018). Phenolic acid content and antioxidant properties of extruded corn snacks enriched with kale. *Journal of Analytical Methods in Chemistry*, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/7830546>
- Kim, S. Y., Sun, Y. O. O. N., Kwon, S. M., Park, K. S., & Lee-Kim, Y. C. (2008). Kale juice improves coronary artery disease risk factors in hypercholesterolemic men. *Biomedical and Environmental Sciences*, 21(2), 91-97. [https://doi.org/10.1016/S0895-3988\(08\)60012-4](https://doi.org/10.1016/S0895-3988(08)60012-4)
- Kjeldahl, J. (1883) A New Method for the Determination of Nitrogen in Organic Matter. *Journal of Analytical Chemistry*, 22, 366-382. <http://dx.doi.org/10.1007/BF01338151>
- Kopsell, D. A., & Randle, W. M. (1997). Selenate concentration affects selenium and sulfur uptake and accumulation by Granex 33' onions. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 122(5), 721-726. <https://doi.org/10.21273/JASHS.122.5.721>
- Kucukyumuk, Z., & Suarez, D. L. (2021). The effect of selenium on salinity stress and selenate–sulfate comparison in kale. *Journal of Plant Nutrition*, 44(20), 2996-3004. <https://doi.org/10.1080/01904167.2021.1936034>
- Lv, J., Wu, J., Zuo, J., Fan, L., Shi, J., Gao, L., & Wang, Q. (2017). Effect of Se treatment on the volatile compounds in broccoli. *Food chemistry*, 216, 225-233. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.08.005>
- Malorgio, F., Diaz, K. E., Ferrante, A., Mensuali-Sodi, A., & Pezzarossa, B. (2009). Effects of selenium addition on minimally processed leafy vegetables grown in a floating system. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 89(13), 2243-2251. <https://doi.org/10.1002/jsfa.3714>
- Michalovicz, L., Müller, M. M. L., Tormena, C. A., Dick, W. A., Vicensi, M., & Meert, L. (2019). Soil chemical attributes, nutrient uptake and yield of no-till crops as affected by phosphogypsum doses and parceling in southern Brazil. *Archives of agronomy and soil science*, 65(3), 385-399. <https://doi.org/10.1080/03650340.2018.1505041>
- Mirmiran, P., Hosseini-Esfahani, F., Esfandiar, Z., Hosseinpour-Niazi, S., & Azizi, F. (2022). Associations between dietary antioxidant intakes and cardiovascular disease. *Scientific Reports*, 12(1), 1504. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-05632-x>
- Mishra, B. S., Singh, M., Aggrawal, P., & Laxmi, A. (2009). Glucose and auxin signaling interaction in controlling Arabidopsis thaliana seedlings root growth and development. *PloS one*, 4(2), e4502. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0004502>
- Moallaye Mazraei, S., Chehrizi, M., & Khaleghi, E. (2020). The effect of calcium nanochelate on morphological, physiological, biochemical characteristics and vase life of three cultivars of *gerbera* under hydroponic system. *Plant Productions*, 43(1), 53-66. <https://doi.org/10.22055/ppd.2019.25085.1574>
- Nawaz, F., Ahmad, R., Ashraf, M. Y., Waraich, E. A., & Khan, S. Z. (2015). Effect of selenium foliar spray on physiological and biochemical processes and chemical constituents of wheat under drought stress. *Ecotoxicology and environmental safety*, 113, 191-200. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2014.12.003>

- Papathanasiou, K., Papadopoulos, I., Tsakiris I., & Tamoutsidis, E. (2012). Vermicompost as a soil supplement to improve growth, yield and quality of lettuce (*Lactuca sativa* L.). *Journal of Food, Agriculture & Environment*, 10: 2. 677-682.
- Poblaciones, M. J., & Broadley, M. R. (2022). Foliar selenium biofortification of broccolini: effects on plant growth and mineral accumulation. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 97(6), 730-738. <https://doi.org/10.1080/14620316.2022.2068458>
- Radomska, D., Czarnomysy, R., Radomski, D., Bielawska, A., & Bielawski, K. (2021). Selenium as a bioactive micronutrient in the human diet and its cancer chemopreventive activity. *Nutrients*, 13(5), 1649. <https://doi.org/10.3390/nu13051649>
- Ruan, Y. L. (2014). Sucrose metabolism: gateway to diverse carbon use and sugar signaling. *Annual Review of Plant Biology*, 65(1), 33-67. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-050213-040251>
- Ruiz, J. M., Rivero, R. M., & Romero, L. (2007). Comparative effect of Al, Se, and Mo toxicity on NO₃-assimilation in sunflower (*Helianthus annuus* L.) plants. *Journal of Environmental Management*, 83(2), 207-212. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2006.03.001>
- Sairanen, I., Novák, O., Pěnčík, A., Ikeda, Y., Jones, B., Sandberg, G., & Ljung, K. (2012). Soluble carbohydrates regulate auxin biosynthesis via PIF proteins in Arabidopsis. *The Plant Cell*, 24(12), 4907-4916. <https://doi.org/10.1105/tpc.112.104794>
- Schiavon, M., & Pilon-Smits, E. A. (2017). Selenium biofortification and phytoremediation phytotechnologies: a review. *Journal of Environmental Quality*, 46(1), 10-19. <https://doi.org/10.2134/jeq2016.09.0342>
- Schiavon, M., Nardi, S., Dalla Vecchia, F., & Ertani, A. (2020). Selenium biofortification in the 21 st century: status and challenges for healthy human nutrition. *Plant and Soil*, 453, 245-270. <https://doi.org/10.1007/s11104-020-04635-9>
- Seppänen, M., Turakainen, M., & Hartikainen, H. (2003). Selenium effects on oxidative stress in potato. *Plant Science*, 165(2), 311-319. [https://doi.org/10.1016/S0168-9452\(03\)00085-2](https://doi.org/10.1016/S0168-9452(03)00085-2)
- Shamsabadi, V., Banjad, H., Ansari, H., & Nemati, H. (2023). Investigating water efficiency and some properties of peppermint plants under conditions of water stress and salinity in the presence of selenium. *Water Management in Agriculture*, 9(2): 115-130. (In Persian) <https://dx.doi.org/10.22034/IWRJ.2022.13964.2428>
- Soja, J., Combrzyński, M., Oniszczyk, T., Biernacka, B., Wójtowicz, A., Kupryaniuk, K., & Oniszczyk, A. (2023). The effect of fresh kale (*Brassica oleracea* var. sabellica) addition and processing conditions on selected biological, physical, and chemical properties of extruded snack pellets. *Molecules*, 28(4), 1835. <https://doi.org/10.3390/molecules28041835>
- Son, J. E., Kim, H. J., & Ahn, T. I. (2020). Hydroponic systems. In *Plant factory* (pp. 273-283). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816691-8.00020-0>
- Song, Y. R., Jiang, X. G., Peng, S. F., Li, F. C., Liu, J., Chen, D., & Liu, F. (2015). Effect of selenium content on the quality and functional components of selenium-rich *Camellia oleifera* oil. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 15(1), 142-149. <https://doi.org/10.16429/j.1009-7848.2015.01.022>
- Sung, Y., & Chen, S. W. (2018). Response of nitrogen metabolism in pak-choi plants treated with different sodium selenate (Na₂SeO₄) concentrations. *The Horticulture Journal*, 87(3), 349-355. <https://doi.org/10.2503/hortj.OKD-083>
- Tan, L., Stagg, L., Hanlon, E., Li, T., Fairley, A. M., Siervo, M., & Shannon, O. M. (2024). Associations between vegetable nitrate intake and cardiovascular disease risk and mortality: A Systematic Review. *Nutrients*, 16(10), 1511. <https://doi.org/10.3390/nu16101511>
- Tanveer, K., Gilani, S., Hussain, Z., Ishaq, R., Adeel, M., & Ilyas, N. (2020). Effect of salt stress on tomato plant and the role of calcium. *Journal of Plant Nutrition*, 43(1), 28-35. <https://doi.org/10.1080/01904167.2019.1659324>
- Tao, J., Leng, J., Lei, X., Wan, C., Li, D., Wu, Y., ... & Gao, J. (2023). Effects of selenium (Se) uptake on plant growth and yield in common buckwheat (*Fagopyrum esculentum* Moench). *Field Crops Research*, 302, 109070. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2023.109070>
- Tavan, M., Wee, B., Fuentes, S., Pang, A., Brodie, G., Viejo, C. G., & Gupta, D. (2024). Biofortification of kale microgreens with selenate-selenium using two delivery methods: Selenium-rich soilless medium and foliar application. *Scientia Horticulturae*, 323, 112522. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112522>
- Vakili, S.H., & Zamani, P. (2022). Effect of combination of nutrients on the parameters of two varieties of lettuce in hydroponic culture with solid substrate. *Scientific Research Journal of Soil and Plant Relations*, 13(3): 63-75. (In Persian) <https://doi.org/10.47176/jspi.13.3.20651>
- Van Delden, S. H., Nazarideljou, M. J., & Marcelis, L. F. (2020). Nutrient solutions for Arabidopsis thaliana: a study on nutrient solution composition in hydroponics systems. *Plant Methods*, 16, 1-14. <https://doi.org/10.1186/s13007-020-00606-4>

- Wang, J., Zhao, B., Wang, X., Yao, J., & Zhang, J. (2012). Synthesis of selenium-containing polysaccharides and evaluation of antioxidant activity in vitro. *International Journal of Biological Macromolecules*, 51(5), 987-991. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2012.08.011>
- Wojciechowska, R., Kołton, A., Długosz-Grochowska, O., & Knop, E. (2016). Nitrate content in *Valerianella locusta* L. plants is affected by supplemental LED lighting. *Scientia Horticulturae*, 211, 179-186. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2016.08.021>
- Xia, Q., Yang, Z., Shui, Y., Liu, X., Chen, J., Khan, S., & Gao, Z. (2020). Methods of selenium application differentially modulate plant growth, selenium accumulation and speciation, protein, anthocyanins and concentrations of mineral elements in purple-grained wheat. *Frontiers in Plant Science*, 11, 1114. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.01114>
- Xue, G., Zhang, G., Sun, Y., Liao, S., & Chen, Y. (2012). Influences of spraying two different forms of silicon on plant growth and quality of tomato in solar greenhouse. *Chinese Agriculture Science Bulletin*, 28(16), 272-276. <https://doi.org/10.11924/j.issn.1000-6850.2011-3863>
- UKMAFF (UK Ministry of Agriculture, Fisheries and Food). (1997/1998). Monitoring programmes for nitrate in lettuce and spinach. *Food Surveillance Information*. Sheet, 154, 19. <https://doi.org/10.1080/026520399283966>
- Yu, L., Chen, Q., Liao, X., Yang, X., Chao, W., Cong, X., & Xu, F. (2023). Exploring effects of exogenous selenium on the growth and nutritional quality of cabbage (*Brassica oleracea* var. capitata L.). *Horticulturae*, 9(3), 330. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9030330>
- Yuan, T. T., Xu, H. H., Zhang, K. X., Guo, T. T., & Lu, Y. T. (2014). Glucose inhibits root meristem growth via ABA INSENSITIVE 5, which represses PIN1 accumulation and auxin activity in *Arabidopsis*. *Plant, Cell & Environment*, 37(6), 1338-1350. <https://doi.org/10.1111/pce.12233>
- Zafeiriou, I., Gasparatos, D., Ioannou, D., & Massas, I. (2022). Selenium uptake by lettuce plants and Se distribution in soil chemical phases affected by the application rate and the presence of a seaweed extract-based biostimulant. *Soil Systems*, 6(2), 56. <https://doi.org/10.3390/soilsystems6020056>
- Zafeiriou, I., Gasparatos, D., Ioannou, D., Kalderis, D., & Massas, I. (2022). Selenium biofortification of lettuce plants (*Lactuca sativa* L.) as affected by Se species, Se rate, and a biochar co-application in a calcareous soil. *Agronomy*, 12(1), 131. <https://doi.org/10.3390/agronomy12010131>
- Zagrodzki, P., Paśko, P., Galanty, A., Tyszkiewicz-Czochara, M., Wietecha-Posłuszny, R., Rubió, P. S., & Gorinstein, S. (2020). Does selenium fortification of kale and kohlrabi sprouts change significantly their biochemical and cytotoxic properties?. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 59, 126466. <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2020.126466>
- Zhang, M., Tang, S., Huang, X., Zhang, F., Pang, Y., Huang, Q., & Yi, Q. (2014). Selenium uptake, dynamic changes in selenium content and its influence on photosynthesis and chlorophyll fluorescence in rice (*Oryza sativa* L.). *Environmental and Experimental Botany*, 107, 39-45. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2014.05.005>

ویراستای نشده